

II Feira de Ciências, Tecnologia e Inovação da UFSM-CS

Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica com motor BLDC acionado por um conversor a base de transistores MOSFET e controle de corrente em malha fechada

Development of an electric bike with a BLDC motor driven by a converter based on MOSFET transistors and closed-loop current control

Rafael Rodrigues¹ , Hilton Abilio Grundling¹ 

¹Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil

RESUMO

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de uma bicicleta com dispositivo de propulsão elétrico. Para o desenvolvimento do protótipo foram estabelecidos requisitos de projeto para atingir alguns objetivos tais como, desempenho e economia de energia. A partir de uma bicicleta convencional, sem propulsão suplementar, foi proposta a inclusão de um motor elétrico do tipo BLDC (*Brushless Direct Current*), acionado por um conversor a base de transistores MOSFET's e alimentado por um sistema de baterias que inclui um sistema de gerenciamento de energia e um controlador microprocessado para medição e controle das correntes, tensões e velocidade. O projeto visa principalmente aplicar tecnologias e conceitos já existentes com o objetivo de desenvolver um meio de transporte ágil, de fácil operação e que seja capaz de atingir o desempenho desejado.

Palavras-chave: Bicicleta elétrica; Motor brushless; Protótipo

ABSTRACT

This paper presents the development of a prototype of a bicycle with an electric propulsion device. For the development of the prototype, design requirements were established to achieve some objectives, such as performance and energy savings. Starting from a conventional bicycle, without additional propulsion, it was proposed to include a BLDC (Brushless Direct Current) type electric motor, driven by a converter based on MOSFET's transistors and powered by a battery system that includes an energy management system and a microprocessor controller for measuring and controlling currents, voltages, and speed. The project mainly aims to apply existing technologies and concepts with the aim of developing a means of transport that is agile, easy to operate, and capable of achieving the desired performance.

Keywords: Electric bicycle; Brushless motor; Prototype

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento nas emissões de carbono nas últimas décadas, iniciou-se uma corrida na busca de tecnologias capazes de reduzir estas emissões e os danos ambientais associados. Assim, através dos avanços tecnológicos e principalmente na tecnologia das baterias de íons de lítio, tem-se oportunizado a utilização de veículos elétricos para contribuir na diminuição dessas emissões. Apesar de, durante o processo de fabricação das baterias, ser produzido uma certa quantidade de poluentes, a utilização destas é de relevância, pois a emissão de carbono na atmosfera é nula durante toda a vida útil das mesmas.

Ainda, diretamente ligado ao problema acima, estão os engarrafamentos dos grandes centros urbanos, pois além de representarem um empecilho para a locomoção das pessoas, também contribuem na emissão de gás carbônico para a atmosfera. Então, com o intuito de amenizar esta situação, o uso de bicicletas elétricas é uma alternativa para se reduzir não só as taxas de emissões de carbono nos centros urbanos, mas também o tempo de deslocamento.

De modo a contribuir para a solução dos problemas citados, foi desenvolvida uma bicicleta elétrica capaz de substituir o uso de alguns veículos convencionais a combustão no deslocamento urbano e em alguns casos até mesmo fora dele.

1.1 Justificativa

Ao se analisar as bicicletas elétricas presentes no mercado nacional, foi constatada a falta de modelos capazes de enfrentar relevos com grande inclinação ou terrenos acidentados. Além disso, problemas como baixa autonomia e aceleração lenta, são fatores que acabam desmotivando o uso desse meio de locomoção.

Assim, buscando trazer uma alternativa realmente capaz de oferecer um meio de transporte confiável e seguro, foi desenvolvida uma bicicleta elétrica capaz de suprir as demandas acima citadas. Através de um sistema de propulsão elétrica adequado, associado a um conjunto de suspensão capaz de transpor os mais diversos obstáculos,

normalmente encontrados no dia a dia, propôs-se uma solução viável em termos de desempenho e economia de energia.

Nesse contexto, este trabalho traz uma abordagem objetiva a respeito do projeto e construção de um protótipo que busca atender os requisitos acima. Além disso, com o objetivo de melhorar um possível produto, ao final deste trabalho também são apresentadas algumas conclusões e sugestões para projetos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição da máquina

Os motores síncronos de ímãs permanentes, alimentados com tensão não senoidal, também são conhecidos como BLDCM. Os mesmos, possuem a densidade de fluxo magnético distribuída de forma uniforme no entreferro e associada a essa característica um estator, de cuja forma a qual foi projetado, proporciona uma força eletromotriz trapezoidal quando o motor opera com velocidade diferente de zero e constante (Chiasson, 2005). A principal característica construtiva destes motores são os ímãs permanentes seccionados e fixados ao rotor da máquina, sendo o estator o responsável por acomodar os enrolamentos, independente da construção mecânica ser *inrunner* (rotor interno e estator externo) ou *outrunner* (estator interno e rotor externo).

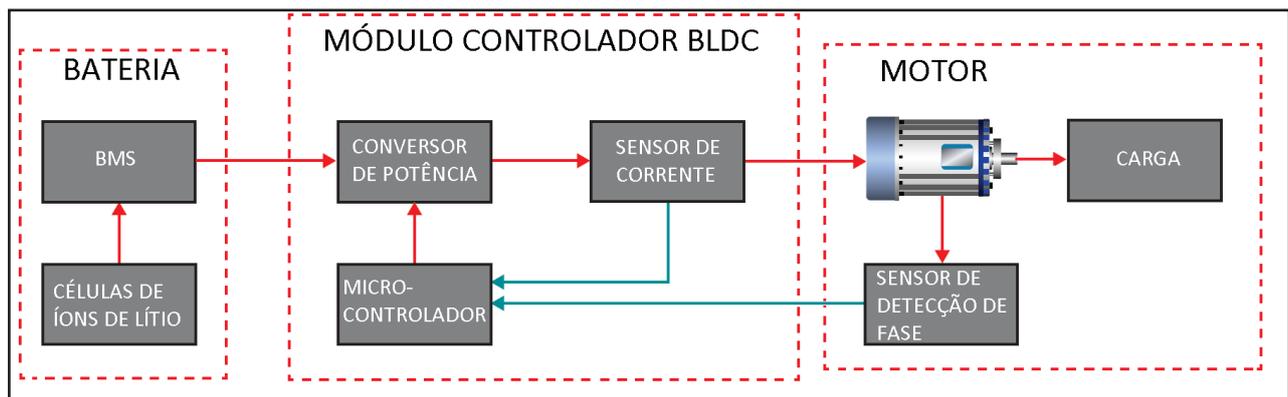
Apesar de não ser uma máquina de baixo custo e necessitar de um sistema de acionamento mais caro e complexo, quando comparado aos motores de corrente contínua escovados, fatores como a ausência de comutadores, larga faixa de velocidade de operação e a resposta linear da relação torque e velocidade, são características cruciais na determinação dessa motorização para a propulsão de motocicletas e bicicletas elétricas.

Buscando obter uma condução suave, eficiente e com baixo custo de manutenção, foi abordada a utilização de um BLDCM (*Brushless Direct Current Motor*) *outrunner* trifásico e de fixação direta na roda.

2.2 Descrição da Planta

Apesar de não ser uma planta complexa, o diagrama da Figura 1 abaixo simplifica seu funcionamento e traz uma melhor compreensão de como o sistema elétrico do protótipo opera.

Figura 1 – Sistema elétrico do protótipo



Fonte: Acervo particular do autor (fevereiro de 2024)

Em (Baratieri, Cássio Luciano, 2011), o autor traz em sua dissertação de mestrado uma breve apresentação a respeito do funcionamento da máquina e a descrição das características construtivas do BLDCM em relação a outros modelos de motores elétricos. Além disso, apresenta algumas vantagens e desvantagens da máquina *brushless* quando comparada a outras. Em seguida, o autor também faz uma rápida abordagem sobre os ímãs permanentes utilizados nessas máquinas elétricas, as características principais de cada material e algumas vantagens e desvantagens. Na sequência, também mostra algumas abordagens construtivas a respeito do formato e posição que os ímãs permanentes ocupam, bem como as consequências mecânicas e elétricas relacionadas.

O modelo dinâmico do BLDCM, considerando algumas hipóteses, simplificações e simetria dos enrolamentos estáticos, bem como correntes balanceadas, é apresentado na equação (1). O conjugado eletromagnético é descrito pela equação (2). Além disso, nas Figuras 2 e 3 apresenta-se também as forças contra eletromotriz

em função da posição rotórica $e_a(r)$, $e_b(r)$ e $e_c(r)$.

Segundo (Baratieri, 2011) a representação matemática pode ser descrita como

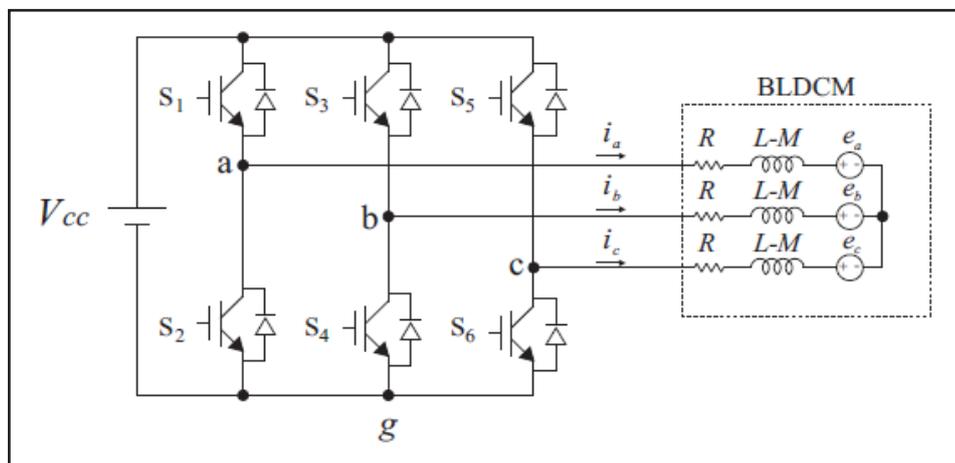
$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ea(\theta r) \\ eb(\theta r) \\ ec(\theta r) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Representação matemática do BLDCM com um inversor trifásico na equação (1), como ilustrado na Figura 2. Já o conjugado eletromagnético é determinado como

$$Te = \frac{1}{\omega r} [ea(\theta r)ia + eb(\theta r)ib + ec(\theta r)ic], \quad (2)$$

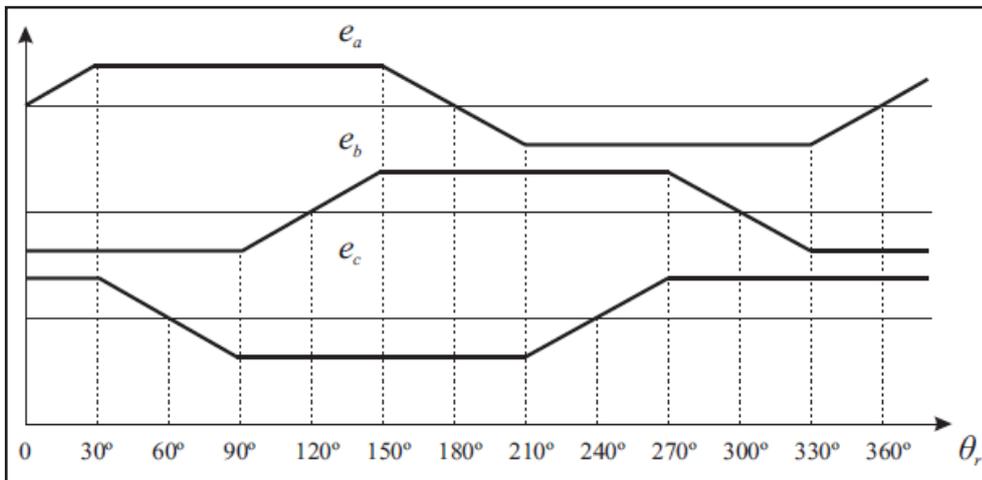
Onde, Te é o conjugado eletromagnético do BLDCM e ωr é a velocidade angular de rotação.

Figura 2 - Representação em parâmetros do BLDCM



Fonte: Baratieri, (2011)

Figura 3 – Força contra eletromotriz em função da posição rotórica



Fonte: Baratieri, (2011)

2.3 Descrição do sistema de acionamento, de controle e de alimentação

Analisando a Figura 1, observa-se que é possível dividir o sistema de alimentação, controle e acionamento em três partes:

Sistema de alimentação: é um conjunto encapsulado em uma caixa de polietileno de alta densidade (PEAD), formado por 120 células de íon lítio modelo 18650 (fabricado por LiitoKala Power Co.,LTD) e um sistema programável de gerenciamento de bateria (BMS) (fabricado por JKBMS).

Sistema de acionamento e de controle: composto pelo módulo controlador BLDC. Este módulo desempenha não só a função de conversão da fonte de corrente contínua (Bateria) para um sinal de corrente alternada, mas também sua modulação de frequência e amplitude. O módulo opera fazendo leituras e controle das correntes e tensões que são aplicadas ao motor elétrico. O sistema também inclui um microcontrolador que realiza todas essas funções.

Para determinar a velocidade que se deseja desenvolver, é enviado um sinal proveniente do acelerador eletrônico para o microcontrolador, o qual é comparado com o sinal medido pelo sensor de efeito Hall existente no motor.

Sistema motor/carga: motor *outrunner* que possui internamente os sensores de efeito Hall para detecção da posição rotórica é conectado diretamente à carga a qual é a própria roda do protótipo.

2.4 Projeto e dimensionamento do protótipo

O projeto iniciou pela definição do sistema de propulsão, sendo que este deveria atender aos requisitos de projeto definidos anteriormente, considerando ainda a relação de custo e benefício. Optou-se pela utilização de um BLDCM trifásico *outrunner* de 3000 Watts de potência nominal, com relação de enrolamentos 3 voltas por bobina (3t), possuindo ainda tensão de operação nominal entre 48 e 72 Volts.

Escolhido o motor, foi definido um módulo controlador compatível com a potência do BLDCM. Neste caso, os principais requisitos a serem observados são: tensão de operação e potência nominal, sendo que essas duas características devem ser compatíveis tanto para a máquina quanto para o módulo controlador. Com o intuito de aumentar a potência nominal extraída do motor em altas rotações, optou-se por um controlador com tensão de operação entre 48 e 72 Volts incluindo um conversor com 24 transistores Mosfet's. Segundo o fabricante, este hardware é capaz de suportar correntes de até 80 amperes. Além disso, o módulo controlador BLDC escolhido, possui seletor de potência máxima de 5760 Watts e que pode ser limitado em 3000 Watts de potência nominal tal como a do motor.

De maneira a atender os parâmetros de tensão e corrente exigidos para suprir o sistema, definiu-se o conjunto de baterias. Visando atender principalmente a alta taxa de descarga de corrente e o menor peso possível, optou-se pelo uso de células de íon lítio 18650 (fabricado por LiitoKala Power Co.,LTD). Para suprir a taxa de descarga de aproximadamente 50 amperes quando trabalhando em potência nominal, foi proposto a utilização de uma bateria mista, onde parte é responsável por suprir o pico de corrente e a outra parte para suprir um longo período de descarga lenta. Assim, com base nos dados da Tabela 1 e os cálculos desenvolvidos abaixo, determinou-se a relação de células a serem adotadas.

Tabela 1 – Características técnicas das células de lítio

	NCR-18650B	HG2-18650
Capacidade	3350 mAh	3000 mAh
Resistência interna	47 mΩ	17 mΩ
Tensão de corte	2,5 V	2,5 V
Tensão nominal	3,6 V	3,6 V
Corrente de descarga contínua	4,8 A	20 A

Fonte: Datasheets NCR18650B e 18650HG2

A partir da Tabela 1 pode-se calcular a Relação de Descarga de Corrente tal como

$$RDC = \frac{17m\Omega}{47m\Omega} \approx 0,36 \quad (3)$$

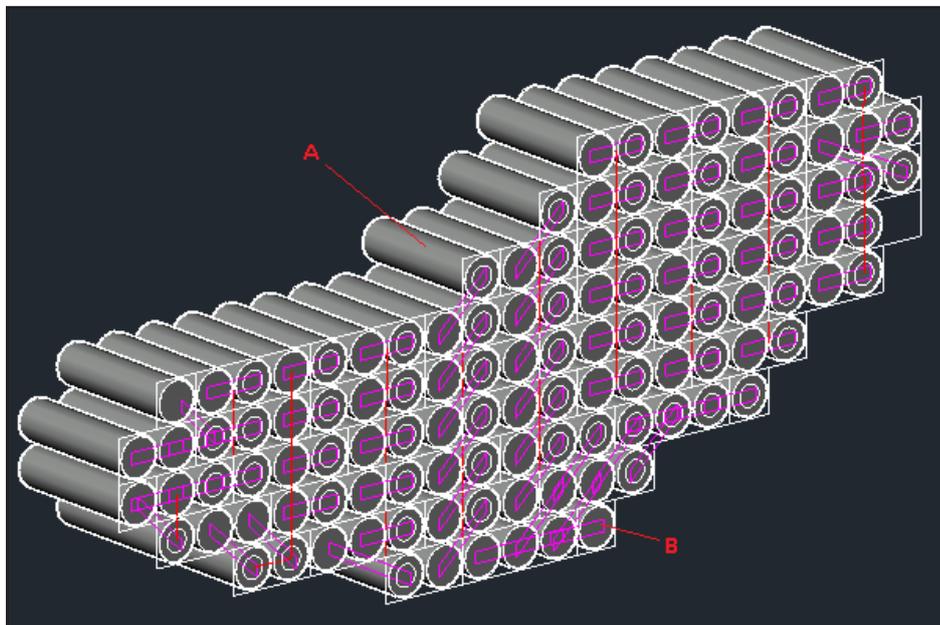
Através da resistência interna das células, foi possível dimensionar a divisão de corrente na bateria, respectivamente para NCR-18650B e HG2-18650, conforme abaixo:

$$0,36 * 50 A = 18 A \quad (4)$$

$$(1 - 0,36) * 50 A = 32 A . \quad (5)$$

Assim, para atender a descarga de corrente de 50 amperes e aos parâmetros de descarga contínua de ambas as células de lítio, chegou-se à quantidade de quatro (4) conjuntos de vinte (20) células em série do tipo NCR-18650B e 2 conjuntos de vinte (20) células em série do tipo HG2-18650 que conectados em paralelo formam a bateria. Sendo assim, é possível atingir uma tensão nominal de 72 Volts em um total de 120 células de íon lítio (4 x NCR-18650B e 2 x HG2-18650).

Figura 4 – Arranjo de células da bateria



Fonte: Acervo particular do autor (2024)

Legenda: A: células de lítio 18650; B: conexões elétricas;

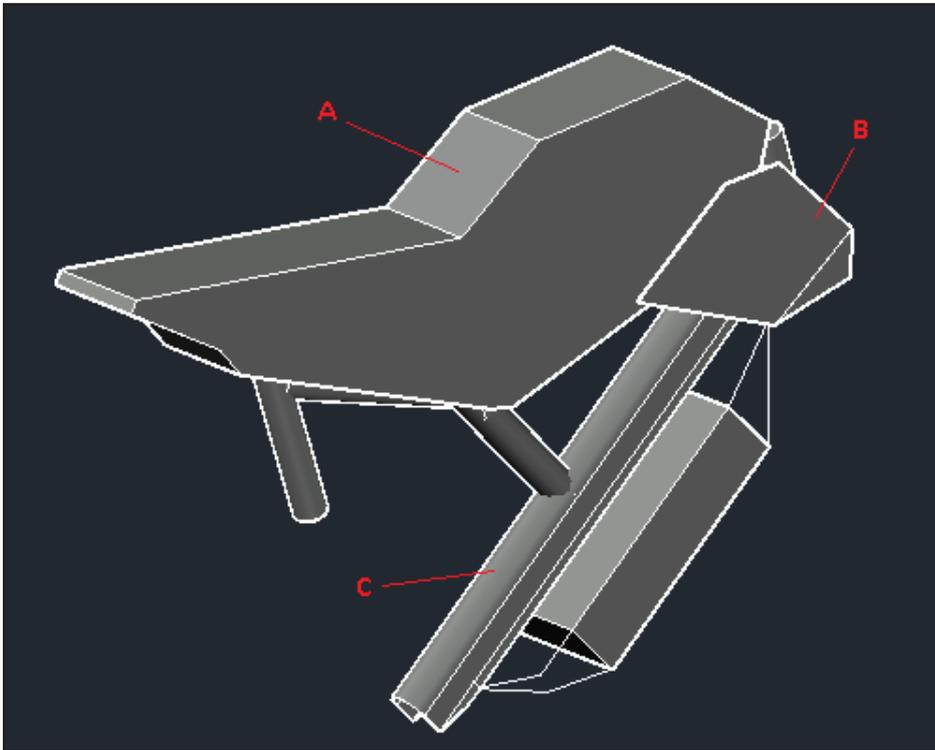
Assim, com base no arranjo de células da bateria calcula-se a capacidade Ampère-hora e de potência da mesma como

$$2 * 3 Ah + 4 * 3,35 Ah = 19,4 Ah \tag{6}$$

$$72 V * 19,4 Ah \approx 1396 Wh. \tag{7}$$

Deste modo, a capacidade nominal teórica da bateria é de aproximadamente 1396 Watt-hora de potência, sendo a tensão nominal 72 Volts com 19,4 Ampère-hora. Para gerenciar a energia do arranjo de células da bateria e melhorar a segurança e durabilidade da mesma, foi integrada uma BMS (*Battery Management System*) programável e inserido todo o conjunto em um encapsulamento de PEAD desenvolvido para o projeto, conforme Figura 5. Além disso, para recarga da bateria, foi utilizado um carregador de 84 V e 5 A de corrente constante.

Figura 5 – Encapsulamento da bateria e carenagens



Fonte: Acervo particular do autor (2024)

Legenda: A: encapsulamento da bateria; B: carenagens de proteção; C: chassis

Ainda, buscando evitar fadiga de componentes mecânicos importantes, foi determinada a substituição completa dos sistemas de freios e suspensão originais da bicicleta. Para equipar o protótipo, buscando maior segurança e conforto, optou-se em utilizar rotores de freio flutuantes com diâmetro maior que o original, pinças de freio hidráulicas com pastilhas em cerâmica e suspensão com curso otimizado e estrutura reforçada, conforme a lista de materiais que compõem o projeto, vide Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais utilizados no protótipo

Lista de materiais
BATERIA
Case para 120 células de PEAD (Desenvolvido exclusivamente para o projeto)
40 Células de lítio Liitokala Power Co.,LTD 18650 Hg2 3000 mAh
80 Células de lítio Liitokala Power Co.,LTD 18650 NCRB 3400 mAh
BMS programável JK-24s8p
Carregador 84V 5A
PROPULSÃO
Motor brushless Garmata 3t 3000W
CONTROLE E POTÊNCIA
Módulo controlador brushless DC 84V 80A Meiandian
SISTEMA DE GERENCIAMENTO ELÉTRICO
Módulo eletrônico (Desenvolvido exclusivamente para o projeto)
Conversor Buck 84V-12V 10A
SISTEMA MECÂNICO
Bicicleta full suspension Colli Bikes
Aro 18x1,65 polegadas de alumínio
Pneu 18x2,75 polegadas Maggion
Freios hidráulicos Zoom HB-875 com pastilhas cerâmicas
Discos de freios Liipro flutuantes 180mm e 160mm
Suspensão traseira 190mm 1000 libras
Suspensão dianteira double crown Zoom

Fonte: Organização dos autores

2.5 Implementação do sistema de acionamento, controle, alimentação e propulsão

Para implementar todo o sistema elétrico descrito acima, foi utilizada uma bicicleta *full suspension* fabricada por Colli Bikes na qual foram realizadas algumas modificações mecânicas. Após as alterações mecânicas no conjunto de suspensão e freio, foi realizada a fixação da bateria na parte superior do chassi, juntamente com a fixação do módulo controlador BLDC na lateral do mesmo, ambas fixadas com parafusos. Do outro lado, foi fixada a caixa que abriga os fios e conexões do sistema de iluminação e a entrada para recarga da bateria.

Na sequência, foi realizada a fixação do motor elétrico em um aro de alumínio de 18 polegadas e respectivo pneu compatível. Realizadas algumas modificações

estruturais e após a inserção do motor no aro o mesmo foi fixado no suporte original do chassi da bicicleta e feitas todas as conexões elétricas necessárias.

Figura 6 – Implementação do protótipo (vista lateral direita)



Fonte: Acervo particular do autor (2024)

Legenda: A: bateria; B: motor brushless direct drive; C: compartimento do sistema de iluminação

Figura 7 – Implementação do protótipo (vista lateral esquerda)



Fonte: Acervo particular do autor (2024)

Legenda: A: bateria; B: motor brushless direct drive; D: módulo controlador BLDC

2.5.1 Ensaio estáticos

Utilizando como base as medidas elétricas realizadas pelo BMS, foi possível realizar algumas medições com o protótipo em repouso, de acordo com a Tabela 3. Ainda é válido ressaltar que, os testes relacionados ao consumo foram executados em tensão nominal de 72 Volts a 25°C. Testes de recarga da bateria foram realizados com corrente constante e temperatura ambiente de 25 °C.

Tabela 3 – Dados obtidos nos testes estáticos

Teste	Resultado
Corrente de equalização	600 mAh
Consumo desligado	50 mAh
Consumo ligado com todo sistema de iluminação acionado	300 mAh
Corrente de carga	4,4 A
Tempo de carga	5 horas
Varição de temperatura de carga	7 a 8 °C

Fonte: Organização dos autores

2.6 Ensaio experimentais

Ao realizar o teste de autonomia do protótipo, a uma velocidade média de 25 km/h percorrendo um trecho de 6 km, foi registrado um consumo médio de 280 Watts. Realizando uma estimativa simples, caso esse consumo seja mantido, sabendo que a capacidade teórica da bateria é de aproximadamente 1396 Watts-horas, a autonomia estimada pode ser obtida através do cálculo abaixo:

$$Tempo = \frac{Capacidade}{Consumo} = \frac{1396 [Wh]}{280 [W]} \approx 4,98 h \quad (8)$$

$$Autonomia = 4,98 [h] * 25 [km/h] \approx 124,5 km \quad (9)$$

Ressalta-se que esta é uma estimativa realizada em uma pista com baixa declividade, baixa velocidade do vento e velocidade constante do protótipo. Fatores

como fortes acelerações ou trajetos com grandes inclinações no relevo, devem comprometer drasticamente a autonomia. Ainda, é válido ressaltar que o teste foi realizado a uma temperatura ambiente de 25°C, podendo a autonomia ser afetada em temperaturas extremas.

O segundo teste, foi executado em uma pista fechada com o intuito de medir a velocidade máxima que o protótipo pode atingir com os 3 modos de condução possíveis, vide Tabela 4, observando-se que no momento do teste a bateria encontrava-se em um percentual de 95% da potência máxima. Utilizando uma pista de aproximadamente 1 km, com declividade inferior a 3%, obteve-se os dados da Tabela 4. Ainda, é válido destacar que a direção do vento em relação a pista era quase que em sua totalidade lateral e praticamente nulo, sem efeitos perceptíveis aos testes.

Tabela 4 – Dados obtidos nos testes de velocidade máxima

Modo de Condução	Potência Nominal do Conjunto Conversor/Motor	Velocidade máxima
Econômico	80%	63 km/h
Normal	100%	79 km/h
Sport	110%	84 km/h

Fonte: Organização dos autores

Ressalta-se que o teste de velocidade final tem apenas o objetivo de verificar todo o potencial do conjunto elétrico e mecânico, não sendo uma velocidade de utilização para o protótipo. Observe que para o uso do protótipo em condição normal foi incluído uma limitação no *hardware* de controle de velocidade em 25 km/h. Além disso, o uso constante em velocidades superiores a limitada no projeto pode ocasionar falhas mecânicas e até mesmo sobreaquecimento do sistema de armazenamento de energia, reduzindo a autonomia e vida útil do conjunto.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto tem como objetivo aliar desempenho, segurança e durabilidade em um só produto. O protótipo desenvolvido pode ser utilizado sem qualquer tipo de limitação em locais privados, para uso recreativo, possuindo grandes vantagens em terrenos extremamente acidentados. Para utilização em ambiente urbano o protótipo deve atender às limitações da legislação vigente.

A fim de prevenir mau funcionamento em temperaturas extremas, recomenda-se o uso de um sistema de dissipação de calor passivo na bateria, podendo ainda ser complementado por um sistema ativo de troca térmica (Peltier), quando operado em temperaturas negativas. Além disso, é válido salientar que de modo a tornar uma condução mais segura e aumentar a vida útil de todo o conjunto, deve-se aumentar o tempo de resposta do controle de limite da corrente, obtendo assim uma resposta de potência mais lenta e conseqüentemente uma aceleração mais suave do protótipo.

Ainda, de maneira a proporcionar uma maior segurança e vida útil do sistema mecânico de frenagem, orienta-se o chaveamento dos Mosfet's do acionamento do motor de modo que as três fases sejam equipotencializadas em zero quando acionada a manete de freio.

REFERÊNCIAS

- BARATIERI, C. L. **Controle de velocidade sensorless de motores brushless dc submetidos a variações periódicas de carga**. 151. Tese (Mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- CHIASSON, J. Modeling and high-performance control of electric machines. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2005.
- LG. 18650HG2, 2014. Disponível em: <https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf>.
- PANASONIC. NCR18650B, 2012. Retrieved from: https://datasheetspdf.com/datasheet/search.php?sWord=ncr18650b&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAloavBhBOEiwAbtAJO7ozNkdpIVK9_xQJc3INScDofs5PMUNVg-VeCm7sJHvwDaGuXuvA-xoC5vMQAvD_BwE.

Contribuição de Autoria

1 – Rafael Rodrigues

Graduando em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria/Cachoeira do Sul.

<https://orcid.org/0009-0001-0083-7965> - rafael.rocha@acad.ufsm.br

Contribuição: Conceituação, Escrita – edição

2 – Hilton Abilio Grundling

Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Professor Titular Livre da Universidade Federal de Santa Maria/Cachoeira do Sul.

<https://orcid.org/0000-0002-7739-2159> - ghilton03@gmail.com

Contribuição: Conceituação – revisão

Como citar este artigo

RODRIGUES, R & GRUNDLING, H. A. Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica com motor BLDC acionado por um conversor a base de transistores MOSFET e controle de corrente em malha fechada. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 46, spe.3, e87051, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5902/217946087051>.